圆钢套管-钢纤维水泥砂浆加固预损 RC 柱轴压性能研究

李哲,冯学伟,吕鑫,邢乐阳,雷家奇

(西安理工大学土木建筑工程学院,710048 西安)

摘　要:圆钢套管-钢纤维水泥砂浆外包加固 RC 柱是一种新型的加固技术。钢纤维水泥砂浆比普通混凝土砂浆在韧性、抗裂性和延性方面都有明显的提高,并且钢套管加固混凝土柱的强度和延性有很大程度的提高。以预加载普通钢筋混凝土柱峰值荷载的百分比作为柱子受损程度指标:加载极限荷载的 60% 为一级损伤、80% 为二级损伤、100% 为三级损伤。总共设计了 7 根试件,分别以钢套管径厚比、RC 损伤程度、预损柱离散性作为影响因素进行轴心受压性能研究。在试验研究的基础上,建立了复合加固钢筋混凝土圆形截面短柱轴压承载力计算公式,计算结果与试验结果吻合良好。

关键词:圆钢套管;钢纤维水泥砂浆;预损 RC 圆柱;复合加固;轴压性能

中图分类号:TU398.9　　**文献标志码:**A　　**DOI:**10.11776/j.issn.1000-4939.2022.02.018

Axial compression performance of pre-cracked RC columns strengthened by round steel casing and steel fiber cement mortar

LI Zhe, FENG Xuewei, LÜ Xin, XING Leyang, LEI Jiaqi

(School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, 710048 Xi'an, China)

Abstract: Round steel casing-steel fiber cement mortar outsourcing reinforcement RC column is a new type of reinforcement technology. Steel fiber cement mortar has a significant improvement in toughness, crack resistance and ductility over ordinary concrete mortar, and the strength and ductility of steel casing reinforced concrete columns has been improved to a large extent. At present, domestic and international research on this method mainly focuses on the performance of unpre-damaged components after reinforcement, while research on the reinforcement of components with different degrees of damage is still relatively lacking. In this paper, the percentage of the peak load of the pre-loaded ordinary reinforced concrete column is mainly used as the damage index of the column: 60% of the ultimate load is primary damage, 80% is secondary damage, and 100% is tertiary damage. A total of seven specimens were designed, and the axial compression test of the damaged columns strengthened with steel casing steel fiber cement mortar was carried out with steel casing diameter-thickness ratio, damage degree of RC, and dispersion of the

收稿日期:2020-10-22　　**修回日期:**2021-11-15

基金项目:国家自然科学基金项目(No.51608441);陕西省自然科学基金(No.2019JM-193)

通信作者:李哲,教授。E-mail:lizhe009@163.com.

引用格式:李哲,冯学伟,吕鑫,等.圆钢套管-钢纤维水泥砂浆加固预损 RC 柱轴压性能研究[J].应用力学学报,2022,39(2):336-341.

LI Zhe, FENG Xuewei, LÜ Xin, et al. Axial compression performance of pre-cracked RC columns strengthened by round steel casing and steel fiber cement mortar[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(2):336-341.

pre-damaged columns as the influencing factors. Based on the experimental study, a formula for calculating the axial bearing capacity of reinforced concrete short circular cross-section columns reinforced by steel fiber cement mortar is established.

Key words: round steel casing; steel fiber cement mortar; pre-damaged RC cylinder; composite reinforcement; axial compression performance

目前,我国现存的旧房屋建筑存在设备老龄化、使用破坏、环境侵蚀等问题,若放任不管继续使用则存在人身风险。对其进行拆除重建,则耗费人力、财力,而且拆除的建筑垃圾造成环境污染,与我国响应建设“资源节约型、环境友好型”社会[1]相违背。近年来,钢套管加固钢筋混凝土柱受到国内外学者的重视,复合材料加固法正在蓬勃发展,并且在结构工程中得到了很好的应用。文献[2-3]对钢套管中加入混凝土来加固 RC 柱,通过与加大试件截面法和外裹 FRP 加固 RC 柱作为对比,发现钢套管加固 RC 柱承载力比其他两种加固形式提高更显著。文献[4]通过在混凝土中添加钢纤维,然后外套钢套管进行轴压力学性能试验,试验结果表明,钢纤维作为一种填充材料可以提高柱的延性,并且对钢套管的屈曲有一定的延缓作用。文献[5]通过钢套管厚度对钢套管内部填充细石混凝土加固柱作了研究。文献[6]研究了矩形开槽钢管约束混凝土柱。文献[7]对钢套管再生混凝土加固柱进行了轴压试验研究。文献[8-9]研究钢套管内部填充自密实混凝土加固 RC 柱试件。

由于目前国内外关于钢套管加固柱的研究,主要集中在未预损坏的构件加固后的性能研究,而对于损坏程度不同的构件加固的研究目前还比较欠缺。所以本研究在现有试验研究的基础上,通过试验结合理论,对钢套管-钢纤维水泥砂浆加固预损柱作了轴心受压试验研究,为以后钢套管-钢纤维水泥砂浆加固柱在工程中的应用提供参考,并建立复合加固短柱承载力计算公式。

1 试验简介

1.1 试件的设计及制作

1.1.1 预损 RC 柱试件的加工与制作

本试验首先对加固预损柱试件进行设计,共设计了 7 个钢筋混凝土柱试件,钢筋混凝土柱截面均为圆形,预损柱为直径为 150 mm 的圆柱,混凝土强度等级采用 C40,设计试件的长度为1 000 mm,箍筋加密区采用间距为 100 mm、直径为 6 mm 的 HPB300 级钢筋,非加密区采用间距为 150 mm、直径为 6 mm 的 HPB300 级钢筋,纵向受力钢筋为 6 根直径为 12 mm的 HRB400 级钢筋。加固前试件加工图、破坏图及试件设计参数如图 1 ~ 图 2 所示。

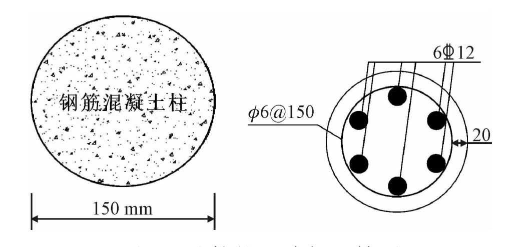
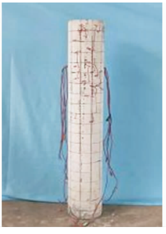
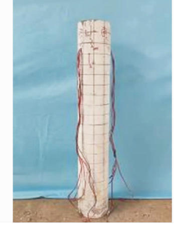


图 1　试件的尺寸与配筋图

Fig. 1　Size and reinforced patterns

(a)100% 预损　(b)80% 预损　(c)60% 预损

图 2　试验加载后不同损伤程度的部分破损试件

Fig. 2　Partially damaged test pieces with different degrees of damage after test loading

1.1.2 预损柱试件的加固流程

为保证圆钢套管与该预损柱之间能够浇筑一定厚度的钢纤维泥砂浆,内直径取 $D = 250$ mm,加固试件操作流程为:预损柱试件表面凿毛处理→预损柱固定在底座上→钢套管包裹预损柱→两者之间空隙浇筑钢纤维水泥砂浆,成为一个整体→养护。加固整体图以及预损柱表面凿毛试件如图 3 ~ 图 4 所示。部分加固浇筑成型试件如图 5 所示。

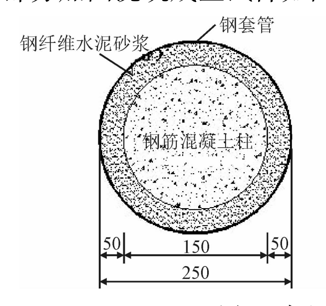




图 3　加固整体图

Fig. 3　Map of reinforced whole




图 4　预损柱表面凿毛试件

Fig. 4　The pre-damage column surface chisel specimen

1.1.3　设计参数

钢纤维参数以及试件参数如表 1 ~ 表 2 所示。

表 1　钢纤维参数

Tab. 1　Steel fiber parameters

钢纤维类型	长度/mm	直径/mm	长径比	抗拉强度/MPa
端承型	35	0.75	47	1 000

表 2　试件参数

Tab. 2　Test piece parameters

试件	预损柱编号	钢管厚度/mm	损伤程度	N_0/kN
ARC3	RC-3	4	二级损伤	3 428
ARC4	RC-4	2	二级损伤	2 344
ARC5	RC-5	6	二级损伤	4 380
ARC6	RC-7	4	一级损伤	3 560
ARC7	RC-1	4	三级损伤	3 192

1.2　试验加载方案

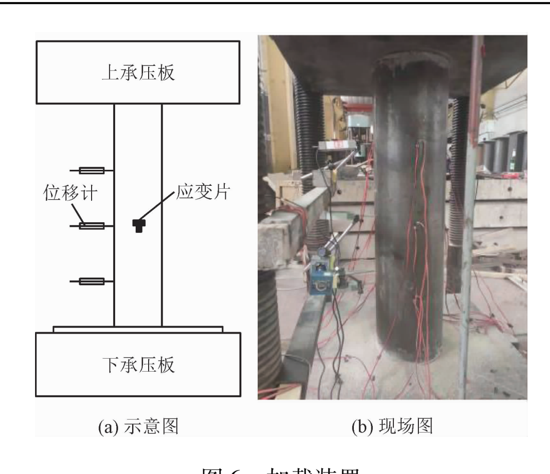
1.2.1　加载装置

本试验采用西安理工大学土木工程学院结构实验大厅 5 000 kN 长柱压力试验机进行试验采集，在试件相应位置布置位移计，并使用 DH3816 静态采集仪采集钢筋与钢套管应变。在试件加载过程中对钢套管的变形情况进行拍照与记录。具体加载装置如图 6 所示。




图 5　部分加固浇筑成型试件

Fig. 5　Partial reinforcement cast molding specimen



(a) 示意图　(b) 现场图

图 6　加载装置

Fig. 6　Loading set-up

1.2.2　加载制度

试件的轴心受压加载采用荷载-位移联合控制的加载方式进行，主要加载过程如下。

1）预加载阶段。首先将试件在固定位置对中后开始预加载，其目的是为了检验加载装置的可靠性、检测各项设备是否能够正常运转，最后将仪器上的各项数据调零。

2）加载过程阶段。调零后对试件首先用等速力控制，进行分级制度加载，每一级采用估算极限荷载的 1/15 进行施加力，每级持荷时间为 5 min，$0.7P_{max}$前用荷载控制。待压力机表盘指针稳定后采集数据。

3）破坏阶段。$0.7P_{max}$之后，开始按等速位移控制，加载速率为 0.5 mm/min，直至试件变形过大或荷载降到极限荷载的 80% 左右时，停止加载，试验结束。

1.2.3　材性试验

对试件中的主要材料（混凝土、钢纤维水泥砂浆）进行了材性测试，如表 3 所示。

表 3　混凝土物性参数

Tab. 3　Concrete physical parameters

强度等级	立方体抗压强度/MPa	轴心抗压强度/MPa
C40	49.8	23
M50	72.1	23.1

根据 GB/T 228.1－2010《金属材料拉伸试验：第 1 部分：室温试验方法》，测试了不同钢套管壁厚与不同直径的钢筋的力学性能，如表 4 所示。

RC 柱采用普通混凝土，设计强度等级为 C40；考虑新旧混凝土黏结力的因素，ARC 柱后浇砂浆采用的钢纤维水泥砂浆强度为 M50；其混凝土各组分

含量如表 5 所示。

表 4　钢材测试结果

Tab. 4　Steel test results

钢材种类	直径/mm	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 f_u/MPa	弹性模量 E/(10^5 MPa)
钢管	2	357.35	420.20	2.12
	4	270.62	415.28	1.95
	6	246.45	352.43	1.94
钢筋 HPB300	6	226.5	317.1	2.1
钢筋 HRB400	12	369.3	530.6	2.0

表 5　混凝土材料掺量

Tab. 5　Concrete material content

混凝土类型	水/kg	水泥/kg	砂/kg	石子/kg	0.5% 钢纤维/kg
C40	205	500	593	1 152	0
M50	593	1 134	269	0	39

2　试件破坏形态及结果分析

2.1　试件破坏过程及现象

对于径厚比不同的复合加固柱试件，多为压屈破坏。不同壁厚(ARC3 为 4 mm 加固 80% 预损、ARC4 为 2 mm 加固 80% 预损、ARC5 为 6 mm 加固 80% 预损)的复合加固柱破坏过程基本类似，从图 7 可以看出，ARC3 试件和 ARC4 试件比 ARC5 试件破坏现象明显，钢套管出现鼓曲变形；而 ARC5 试件由于钢套管厚度较厚，钢管表面无鼓曲现象，只是焊缝从柱端部竖向开裂。



图 7　试件破坏形态

Fig. 7　Failure modes of specimens

不同损伤程度(ARC3 为 4 mm 加固 80% 预损、ARC6 为 4 mm 加固 60% 预损、ARC7 为 4 mm 加固 100% 预损)，试件破坏状态主要为腰鼓型。从图 7 可以看出损伤程度越高，试件承载力越低且试件破坏现象越明显，ARC7 试件表面较其他两个试件鼓曲变形较大，并且试件下部钢管发生严重的褶皱现象。

2.2　荷载-位移曲线分析

各复合加固柱试件的荷载-位移曲线如图 8 所示。

图 8(a)是不同厚度的钢套管加固损伤程度为 80% 预损柱的加固柱，从荷载-位移曲线中可以看出，随着圆钢套管厚度的增加，其承载力显著提高。当达到峰值荷载之后，随着套管壁厚的增大，试件曲线下降越平缓或持平，展现出钢套管加固预损柱具有良好的延性，在一定加固范围内减小加固试件钢套管的径厚比可以提高轴压力学性能。

图 8(b)是 4 mm 厚度的钢套管加固不同损伤程度预损柱的荷载-位移曲线对比图。钢套管厚度一定时，加固损伤程度越小的试件承载力越高，但其试件的刚度变化不大。当试件承载力下降到破坏极限荷载的 95% 左右时，其损伤程度越小，试件承载力下降越缓慢，表明试件具有较好的延性。选择适当的破损程度对于提高加固试件的变形能力是有利的。

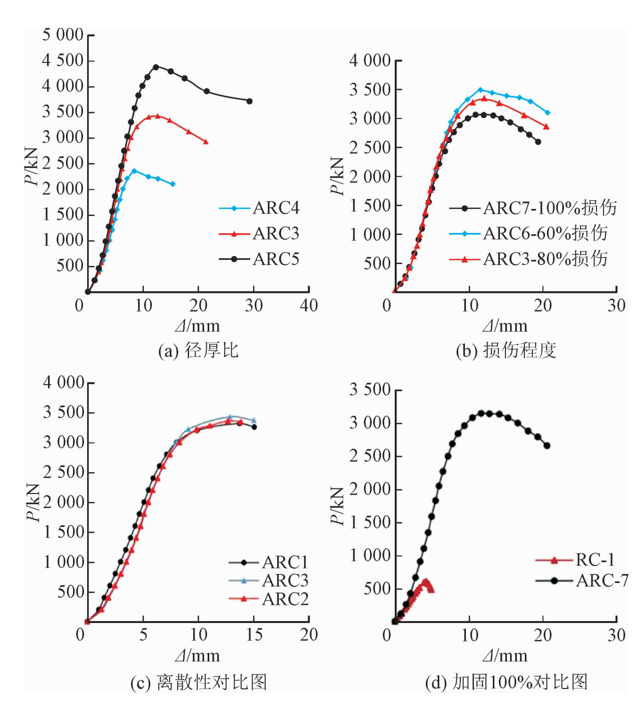


图 8　复合加固轴心荷载-位移曲线

Fig. 8　Composite reinforcement axial load-displacfement curve

图 8(c)是 4 mm 厚度的钢套管加固考虑离散性预损柱的荷载-位移曲线对比图。从图中可以明显

看出，当钢套管厚度一定时，加固3种损伤程度相同的预损柱，其复合加固柱的离散性很小。这说明钢套管、钢纤维水泥砂浆、预损柱能够很好的协同工作，钢纤维水泥砂浆与凿毛的预损柱黏结在一起，复合加固效果显著。故加固试件时可以不用考虑内部核心柱的离散性。

图8(d)是4 mm厚度的钢套管加固损伤程度为100%的预损柱。未加固钢筋混凝土100%预损柱的轴压承载力在达到荷载峰值后迅速下降，延性较差。采用钢套管-钢纤维水泥砂浆加固后，由于钢纤维具有较高的延性，且钢套管同样可以提高试件的强度和延性，由图8(d)中可以看出加固100%损伤的预损柱，其承载力与刚度比未加固预损柱显著提高，加固后至极限荷载后，对比未加固柱来说曲线下降与速缓慢，体现了钢套管加固具有良好的延性。

2.3 荷载-应变曲线分析

将试验测得钢管应变进行算数平均，得到钢管平均应变，如图9所示，其中拉应变为正，压应变为负。

图9(a)给出了钢套管厚度变化下，加固损伤程度为80%的预损柱试件的荷载-平均应变曲线及承载力。从图9(a)中可以看出，随着钢管厚度的增加，试件的承载力和延性显著提高。当厚度从2 mm分别增加到4 mm和6 mm时，加固预损柱的峰值承载力分别提高了68.4%和53.5%。

图9(b)表示为4 mm厚的钢套管加固不同损伤程度的荷载-平均应变曲线及承载力。从图9(b)中可以看出，钢管应变曲线在加载初期环向应变相比较纵向应变基本处于线弹性阶段。表明加固损伤程度越小的试件，越能提高试件的轴压承载力和延性变形能力。

图9(c)表示为4 mm厚的钢套管加固相同损伤程度的预损柱荷载-平均应变曲线及承载力。考虑混凝土具有较大的离散性，而从图9(c)中可以看出，钢套管厚度一定时，加固相同损伤程度试件在加载初期，3个试件的环向应变与纵向应变均处于弹性阶段，其刚度无变化。达到峰值荷载后，3个加固试件的承载力和刚度基本无变化，曲线大部分仍处于重合状态，下降段均较为缓慢。试验结果表明，相同壁厚的钢套管填充钢纤维水泥砂浆加固3种损伤程度相同的预损柱，其试件离散性很小，说明复合加固效果较好，延性和变形能力展现良好。

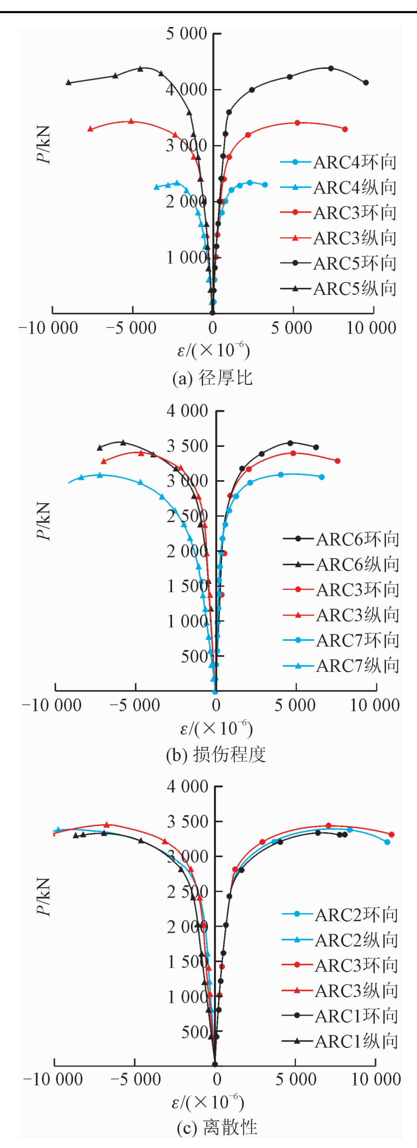


图9 复合加固轴心荷载-应变曲线

Fig. 9 Axial load-strain curve of composite reinforcement

3 轴压承载力计算

文献[9]对钢套管混凝土加固柱作了大量的轴心受压试验研究，从试验基础上提出了加固后的承载力公式，所采用的假定承载力是由钢管与内部混凝土叠加而成，并且没有考虑初始应力对试件的影响。考虑到钢管的约束作用，从而提出以下公式。

$$N = f_{c1}A_{c1} + f_{c2}A_{c2} + kf_yA_s \tag{1}$$

$$k = 0.68\ln(t/r) + 4.75 \tag{2}$$

在外套钢管钢纤维水泥砂浆加固中，钢套管和填充水泥砂浆既能够独自发挥作用，又可以协同工作在一起。假定复合式加固柱的承载力由圆柱混凝土、钢筋、填充材料及钢套管的承载力组成。若不考虑它们之间的相互作用，加固柱叠加承载力计算式为

$$N = f_{ty}A_t + f_{c1}A_{c1} + f_{c2}A_{c2} + f_{sy}A_s \quad (3)$$

通过本试验可知,内置预损柱的损伤程度是影响加固柱极限承载力的一个关键因素。结合式(1)、式(3),考虑损伤系数 φ 和套箍系数 θ 后,分别在式(3)的基础上增加套数系数 θ 和损伤系数 φ 作为本次试验的承载力公式。根据受损程度的不同,根据试验结果拟合出一个 ω 与 φ 的关系式:$\varphi = -2.4125\omega^2 + 2.1375\omega + 0.513$(一级损伤时 $\omega = 0.6$,二级损伤时 $\omega = 0.8$,三级损伤时 $\omega = 1$),式中具体各参数见文献[9]。新推导的公式为

$$N = \theta f_{ty}A_t + \varphi f_{c1}A_{c1} + f_{c2}A_{c2} + f_{sy}A_s \quad (4)$$

$$\theta = 0.68\ln(t/r) + 4.75 \quad (5)$$

式中:k 为考虑加固钢套管对混凝土约束的强度提高系数;f_{c1}、f_{c2} 分别为预损柱混凝土轴心抗压强度和加固部分钢纤维水泥砂浆的轴心抗压强度;A_{c1}、A_{c2} 分别为圆柱混凝土截面面积、加固部分钢纤维砂浆的截面面积;f_{ty} 为钢套管的屈服强度;A_t 为钢管的横截面积;t 为加固圆形钢套管的厚度;r 为钢套管的内半径。

计算值与试验值比较如表 6 所示,采用式(4)、式(5)计算钢套管不同厚度各个试件的承载力分别为:ARC3 承载力为 3 316 kN,ARC4 承载力为 2 055 kN,ARC5 为 4 275 kN。理论计算值与试验实际值的比值平均为 0.98,标准差为 0.011,计算结果与试验结果吻合较好,可为工程应用提供参考。

表 6 计算值与试验值比较

Tab. 6 Comparison of test values with calculated values

编号	钢管厚度/mm	计算值/kN	试验值/kN	计算值/试验值
ARC1	4	3 312	3 316	0.99
ARC2	4	3 312	3 357	0.98
ARC3	4	3 312	3 428	0.97
ARC4	2	2 313	2 344	0.99
ARC5	6	4 334	4 380	0.99
ARC6	4	3 413	3 560	0.96
ARC7	4	3 129	3 192	0.98

4 结 论

本研究通过试验,得出如下结论。

1)RC 不同程度预损柱采用钢套管-钢纤维水泥砂浆加固后,试件随着钢套管厚度的增加,其刚度、延性、承载力,都比未加固柱有显著提高,钢套管-钢纤维水泥砂浆加固柱的加固效果显著。当厚度从 2 mm分别增加到 4 mm 和 6 mm 时,加固预损柱的峰值承载力分别提高了 68.4% 和 53.5%,适用于需大幅度提高承载力的加固情况。

2)对于不同损伤程度的加固柱,当钢套管厚度一定时,损伤程度越小,试件承载力越高,但其刚度变化不大。当试件承载力下降至峰值荷载 95% 左右时,损伤程度越小,加固柱表现出较好的延性与变形能力,试件的鼓曲现象主要集中在峰值荷载之后。

3)从荷载-应变曲线与荷载-位移曲线得出,随着套管壁厚的增大和预损柱损伤程度的变化,其刚度变化很小,承载力和延性表现突出。考虑离散性影响,从曲线可以得出加固试件离散性很小,说明复合加固效果较好,延性和变形能力展现良好。

4)通过叠加原理分析出了钢套管-钢纤维水泥砂浆加固预损柱承载力计算公式,计算值与试验值吻合较好。

参考文献

[1] 李秋义,全洪珠. 再生混凝土性能与应用技术[M]. 北京:中国建材工业出版社,2010.

[2] MILLER E A. Experimental research of reinforced concrete column strengthening methods [D]. Ohio State: Ohio State University, 2006:222-230.

[3] EZEN H, MILLER E A. Experimental evaluation of axial behavior of strengthened circular reinforced-concret ecolumns[J]. Journal of bridge engineering, 2011, 16(2):238-247.

[4] CAMPIONE G, MENDOLA L L, SANPAOLESI L, et al. Behavior of fiber reinforced concrete-filled tubular columns in compression[J]. Materials & structures, 2002, 35(250):332-337.

[5] 滕祯昳. 钢套管加固钢筋混凝土短柱轴压力学性能研究[D]. 成都:西华大学,2019.

[6] 魏洋,柏佳文,张依睿,等. 矩形开槽钢管混凝土柱的受压承载性能[J]. 东南大学学报(自然科学版),2020,50(2):237-243. (WEI Yang, BAI Jiawen, ZHANG Yirui, et al. Compression bearing capacity of rectangular slotted concrete-filled steel tube columns [J]. Journal of Southeast University (natural science edition), 2020, 50 (2):237-243(in Chinese)).

[7] 何岸,蔡健,陈庆军,等. 钢套管再生混凝土加固柱轴压试验[J]. 西南交通大学学报,2018,53(6):1187-1194. (HE An, CAI Jian, CHEN Qingjun, et al. Axial compression test of reinforced column reinforce d with steel casing[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(6):1187-1194 (in Chinese)).

[8] 薛继锋,卢亦焱,梁鸿俊,等. 钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土圆形短柱承载力研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2014,47(6):769-773. (XUE Jifeng, LU Yiyan, LIANG Hongjun, et al. Study on bearing capacity of reinforced concrete circular short columns strengthened with steel tube self-compacting concrete [J]. Journal of Wuhan University (engineering science edition), 2014, 47(6):769-773(in Chinese)).

[9] 徐进. 钢套加固混凝土柱的力学性能研究[D]. 广州:华南理工大学,2007.

(编辑 李坤璐)